

Monitor Cubonner para medir la dosis equivalente ambiental en torno a los LINACs de uso médico

Antonio Baltazar-Raigosa¹, Tzinnia Gabriela Soto-Bernal², Carina Oliva Torres-Cortés¹, Hector Rene Vega-Carrillo^{1,3}, José Manuel Ortiz Rodríguez¹, Luis Octavio Solís Sánchez¹

¹ Programa de Doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada
Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas
Zacatecas, Zac. México.

² Programa de Doctorado en Ciencias Básicas (Ciencias Nucleares) de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Zac. México.

³ Unidad Académica de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas
Zacatecas, Zac, México

Resumen

El incremento de los casos de cáncer en la población mundial, ha propiciado un aumento en el número de aceleradores lineales, o LINACs, como una alternativa para su tratamiento. La determinación del espectro de los fotoneutrones o los electroneutrones en los LINACs se ha vuelto un tema de interés, ya que con el espectro se puede obtener cualquier magnitud dosimétrica, así como la rapidez de reacción entre los neutrones y los materiales dentro de la sala de tratamiento. Sin embargo, la medición es complicada porque dentro de la sala se produce un campo de radiación intenso, mixto y pulsado, que inhibe el uso de detectores activos. El objetivo de este trabajo es diseñar un monitor pasivo de área para neutrones. Éste usa una laminilla de oro ubicada en el centro del sistema moderador de geometría regular. Mediante métodos Monte Carlo se estimó la función respuesta para neutrones monoenergéticos colocando la laminilla en dos posiciones, horizontal y perpendicular al haz incidente; también se estimó la función respuesta para la $H^*(10)$. La función respuesta del monitor de área tiene su máximo para neutrones de 1 MeV, lo que coincide con el máximo del espectro de los neutrones generados en los LINACs. El monitor permite medir la $H^*(10)$ debida a los neutrones dentro de la sala de tratamiento.

Palabras clave: $H^*(10)$; Neutrones; Monitor de Área; LINACs.

1.- INTRODUCCIÓN

La recurrencia del cáncer en la población mundial en la actualidad se ha ido incrementando, a la fecha se han encontrado más de 200 tipos diferentes de esta enfermedad [Kim *et al.*, 2016; Hernández-Adame *et al.*, 2010].

Sin embargo, el diagnóstico y tratamiento de la misma también han ido evolucionando como los es mediante la aplicación de las radiaciones ionizantes, dicho tratamiento se aplica en conjunto con otras técnicas como la cirugía y la quimioterapia para lograr una mayor eficiencia para erradicar los tumores en los pacientes [Kim *et al.*, 2016; Yiğit 2013].

De las técnicas mencionadas anteriormente tan solo el 60% de los tratamientos se llevan a cabo mediante LINAC's de uso médico [Soto-Bernal., *et al.*, 2018; Yiğit 2013]. Cuando un LINAC opera por encima de los 10 MeV se producen neutrones indeseables al interior de la sala de tratamiento principalmente por las reacciones fotonucleares debido a la interacción del haz terapéutico con los átomos de los materiales de alto número atómico del cabezal, de igual forma en las paredes de la sala y el propio cuerpo del paciente [Soto-Bernal, *et al.*, 2018; Romero-Expósito, *et al.*, 2015; Benites-Rengifo *et al.*, 2014].

Los fotoneutrones generados al interior de la sala de tratamiento liberan una dosis indeseada al paciente y al personal que labora en dichos espacios, [Soto-Bernal, *et al.*, 2018], de igual forma los neutrones térmicos presentes pueden generar la activación de algunos radionúclidos de los materiales que se encuentran al interior de la sala convirtiéndose en fuentes emisoras de radiación desde algunos segundos hasta días [Mohammadi *et al.*, 2016; Konefal *et al.*, 2012; Polaczek-Grelik *et al.*, 2012].

Las condiciones particulares que se generan al interior de la sala de tratamiento en torno al LINAC al momento de aplicar el tratamiento al paciente, dificulta el uso de los detectores activos para determinar el espectro de los neutrones, debido a que se genera un campo de

radiación intenso, pulsado y mixto [Benites-Rengifo *et al.*, 2014; Mohammadi, *et al.*, 2015] provocando errores en las lecturas.

Por lo antes mencionado se usan frecuentemente detectores pasivos como TLD, laminillas de activación, detectores de trazas, los cuales al no requerir electrónica adicional y fuente de alimentación no se ven afectados al momento de realizar las mediciones para determinar el espectro de neutrones al interior de las salas de tratamiento [Králik, *et al.*, 2015; Mohammadi, *et al.*, 2015].

Sin embargo en la actualidad los monitores de área que existen comercialmente trabajan principalmente en modo activo, lo que limita su aplicación en torno a LINACs y áreas en condiciones semejantes [Valero-Luna *et al.*, 2012], como el Berthold LB 6411 el cual utiliza como detector de neutrones térmicos un contador proporcional cilíndrico de ^3He en su interior [Chu, *et al.*, 2016].

Con base en lo anterior se presenta la necesidad de tener una alternativa de medición adicional en modo pasivo el cual pueda ser empleado en campos intensos de energía, pulsados y mixtos.

El objetivo del presente trabajo de investigación fue calcular la función respuesta de un monitor de área propuesto para evaluar su desempeño en la medición de la dosis equivalente ambiental ($H^*(10)$) de los fotoneutrones y electroneutrones producidos en LINAC's de uso médico.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente estudio se empleó el código Monte Carlo MCNP5, debido a que este software permite hacer la representación de los objetos muy apegados a la realidad en cuanto a su composición y simular el transporte de partículas cargadas y neutras a través de la materia y obtener parámetros de importancia para su interpretación [Çeçen 2013; Vaz 2010].

Se calculó la función respuesta, la fluencia y la dosis equivalente ambiental de los neutrones al interactuar con el detector de laminilla de oro, el estudio se realizó con 60 fuentes monoenergéticas en un rango de energías las energías de $1\text{E}(-9)$ a 20 MeV.

Para determinar el espesor de moderación con la mejor eficiencia según el sistema propuesto, se consideraron espesores de moderador de 5, 8 y 10 pulgadas de arista y se obtuvo la función de dosis equivalente ambiental para cada espesor.

Al definir el tamaño de moderador más eficiente, se realizó la estimación de la fluencia y la función respuesta colocando la laminilla de oro en posición horizontal y vertical con respecto al termino fuente, como se muestra en las figuras 1 y 2, con la finalidad de determinar si se afecta la respuesta del sistema al variar la posición del detector al interior del moderador.

El sistema de moderación cubico se modelo de polietileno de baja densidad (0.92 g/cm^3), el término fuente se colocó paralelo a una de las caras del moderador con un centímetro de separación entre la fuente y moderador como se muestra como se muestra en las figuras 1 y 2.

Al modelado del polietileno se le dio un tratamiento (α,β) dentro del código MCNP 5C para darle un tratamiento químico para los efectos de los neutrones en el polietileno [Bedogni, *et al.*, 2016; Gómez-Ros, *et al.* 2015; Rühm *et al.*, 2014]. Se colocó al centro del moderador la laminilla de oro de 2.6 cm de \varnothing y 0.03 cm de grosor, con una pureza de 100% de Au 197 y una densidad de 19.3 g/cm^3 . Se empleó un estimador del tipo tally 4 en la celda que describe

la laminilla de oro. Se consideró un número de historias suficientemente grande para garantizar incertidumbres menores o iguales al 1%.

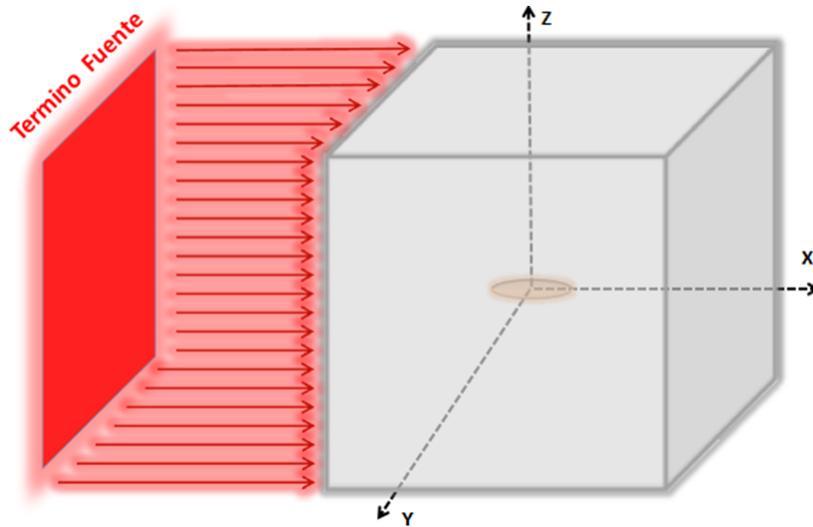


Figura 1. Monitor de área pasivo con laminilla de oro horizontal al flujo.

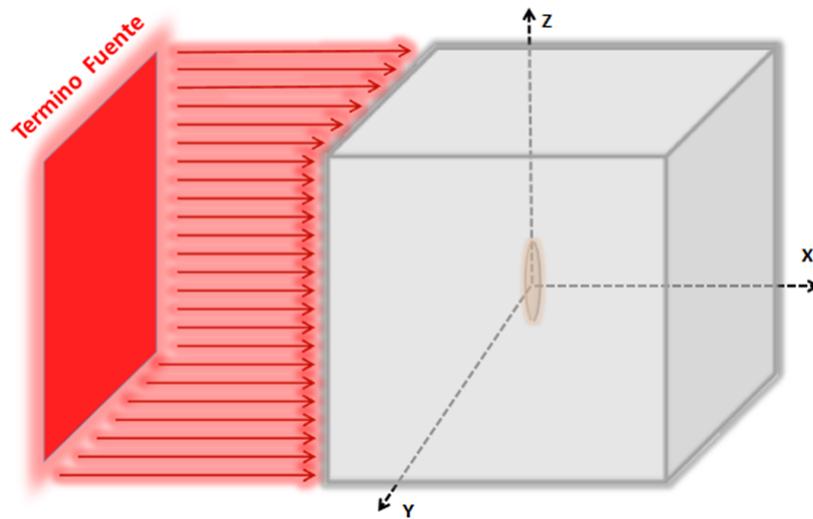


Figura 2. Monitor de área pasivo con laminilla de oro vertical al flujo.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la finalidad de presentar una herramienta como monitor pasivo se caracterizaron y obtuvieron las respuestas de fluencia a dosis de los moderadores de 5, 8 y 10 pulgadas de arista para determinar el que tenga la mejor respuesta al obtener la $H^*(10)$. Como se observa en la figura 4 el moderador cúbico que presenta una mejor respuesta es el de 5”.

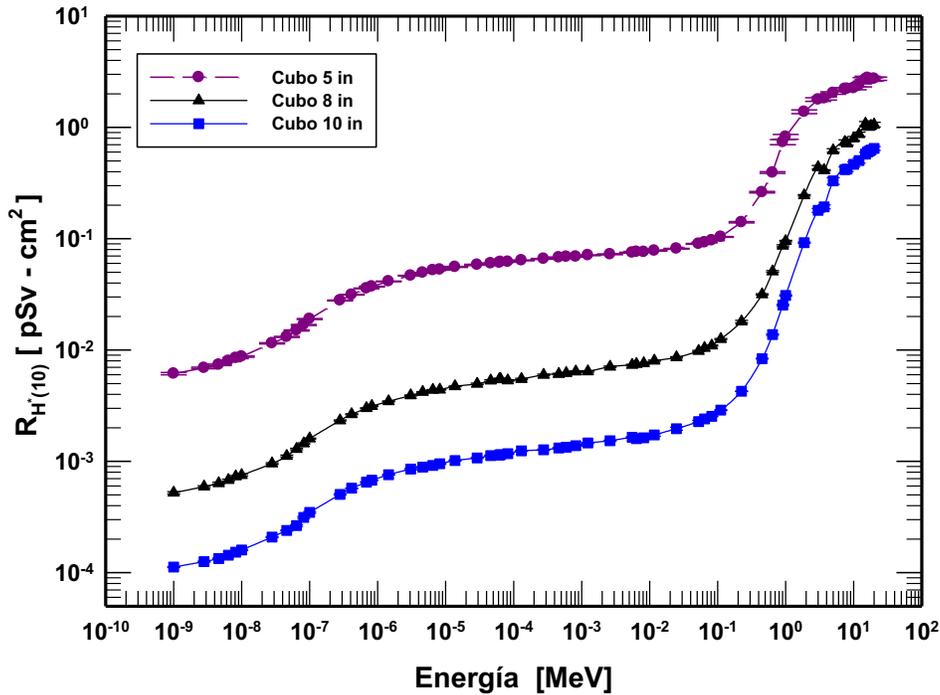


Figura 4. $H^*(10)$ calculada para el espesores de 5 “, 8” y 10”.

Con los resultados obtenidos en la figura 4, se comprueba que es una alternativa como un monitor de área pasivo para determinar el espectro de los neutrones con energía de 1 MeV, debido a que como lo reporta la literatura, los neutrones que se generan en los LINAC’s que operan por encima de 8 MeV se encuentran alrededor de 1 MeV [Romero-Exposito *et al.*, 2015; Vega-Carrillo & Baltazar-Raigosa 2011], debido a que el monitor de área pasivo de 5” tiene una máxima eficiencia para esa energía de los neutrones como se observa en la figura 5 .

Las incertidumbres asociadas a cada punto son menores o iguales a 1%. Las funciones respuesta se calcularon para neutrones desde 1E(-9) a 20 MeV.

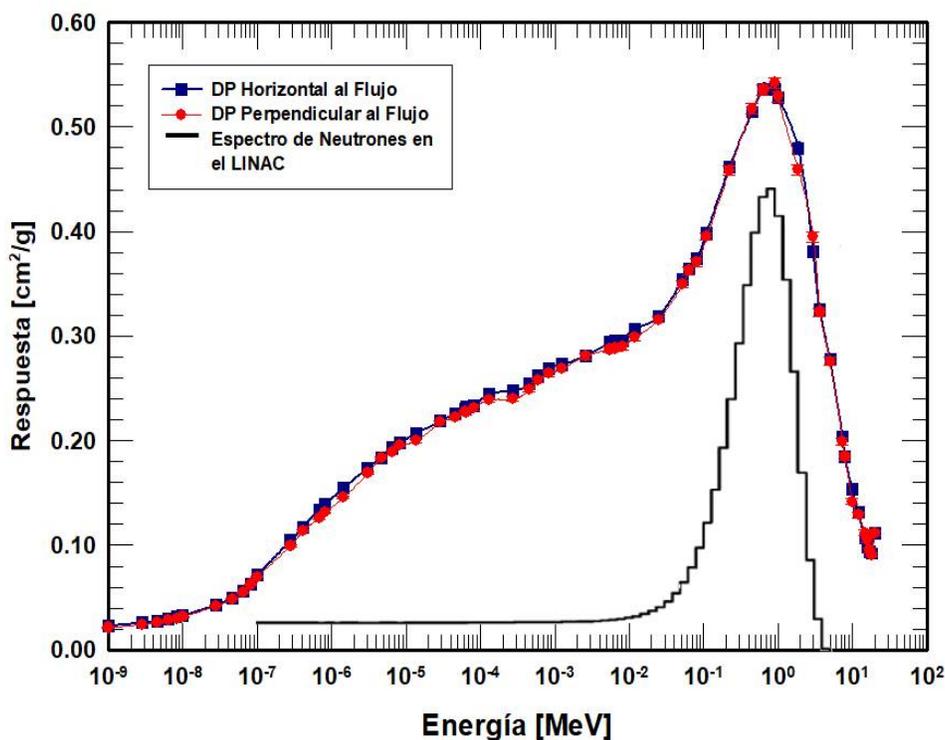


Figura 5. Espectro de fotoneutrones en los LINAC's y la respuesta del monitor de área pasivo de 5''.

De igual forma, en la figura 5 se valida que no importa la posición en la cual se coloque el detector de laminilla de oro al centro del sistema de moderación como lo reporta Valero-Luna *et al.*, (2012) y Guzmán-García, *et al.*, (2012).

La caracterización de las áreas en las cuales se encuentran inmersos los neutrones en términos del espectro de la fluencia en cierto punto, es esencial para determinar las magnitudes dosimétricas como lo es $H^*(10)$, la D y con ésta la E [Bedogni *et al.*, 2016], para este caso en particular se utilizaron los coeficientes de conversión de fluencia a $H^*(10)$.

4.- CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos en el presente trabajo se concluye que se logró el objetivo planteado en la investigación. Mediante métodos Monte Carlo se ha diseñado un monitor de

área pasivo, se determinó su función respuesta, fluencia, y función respuesta de $H^*(10)$ para validar el diseño y desempeño.

- La función respuesta $H^*(10)$ del monitor de área pasivo propuesto se asemeja a la respuesta de los monitores de área reportados en la literatura lo cual respalda que los resultados obtenidos son favorables para emplearlo como una alternativa a los monitores de área ya existentes.
- De acuerdo a la caracterización del monitor de área pasivo mediante un detector térmico para neutrones de laminillas de oro, el flujo de neutrones y las reacciones producidas sobre el detector no dependen de la posición en la cual se coloque el detector centrado al interior de cada moderador, la función respuesta obtenida no presenta diferencias considerables cuando el detector se coloca en posición vertical u horizontal, en un rango de neutrones térmicos a 20 MeV, lo cual facilita su uso.
- Valiéndose de los resultados obtenidos se determinó que puede ser empleado como un monitor de área pasivo para determinar la $H^*(10)$ alrededor de los LINAC's, el cual presenta una muy buena eficiencia y un máximo para la medición de los neutrones con energía alrededor 1MeV.

Agradecimientos

El autor A. Baltazar-Raigosa agradece a la Coordinación del Doctorado de Ingeniería y Tecnología Aplicada y a la Coordinación de Investigación de la Universidad Autónoma de Zacatecas, por el apoyo con la beca con la industria para desarrollar la presente investigación doctoral. Las co-autoras T.G. Soto Bernal, C.O. Torres Cortés agradecen el apoyo del CONACyT por la beca recibida para realizar estudios de doctorado.

REFERENCIAS

Bedogni, R.; Bortot, D.; Buonomo, B.; Esposito, A.; Gómez-Rios, J.M.; Introini, M.V.; Mazzitelli, G.; Moraleda, M.; Pola, A.; Romero, M. (2016). *A Single-Exposure*,

- Multidetector Neutron Spectrometer For work place Monitoring*. Radiation Protection Dosimetry **170**:326-330.
- Benites-Rengifo, J.L.; Vega-Carrillo, H.R.; Velazquez-Fernandez, J. (2014) *Photoneutron spectrum measured with a Bonner sphere spectrometer in planetary method mode*. Applied Radiation and Isotopes. **83**: 256-259.
- Chu, M.C.; Fung, K.Y.; Kwok, T.; Leung, J.K.C.; Lin, Y.C.; Liu, H.; Luk, K.B.; Ngai, H.Y.; Pun, C.S.J. & Wong, H.L.H. (2016). *Development of a Bonner Sphere neutron spectrometer from a commercial neutron dosimeter*. Journal of Instrumentation. **11**: 1-23.
- Çeçen, Y. (2013) *Monte Carlo radiation transport in external beam radiotherapy*. Bitlis Eren University Journal of Science & Technology. **1**: 1-5.
- Guzmán-García, K.A.; Borja-Hernández, C.G.; Valero-Luna, C.; Hernández-Dávila, V.M.; Vega-Carrillo, H.R. (2012). *Passive neutron area monitor with TLD pairs*. Revista Mexicana de Física. **58**: 220-223.
- Gómez-Ros, J.M.; Bedogni, R.; Bortot, D.; Buonomo, B.; Esposito, A.; Gentile, G.; Lorenzoli, M.; Introini, M.V.; Mazitelli, G.; Moraleda, M.; Pola, A.; Sacco, D. (2015) *CYSP: A new cylindrical directional neutron spectrometer. Conceptual design*. Radiation Measurements. **82**: 47-51
- Hernández-Adame, L.; Contreras-Sandoval, H.; Vega-Carrillo, H.R.; Perez Landeros, L.H. (2010). *Design of a treatment room for an 18-MV LINAC*, Nuclear Technology, **175**: 105-112.
- ICRP. (1996). *Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation*. ICRP Publication 74. Annals of the ICRP, **26**: 199.
- Kim, Y.S.; Khazaei, Z.; Ko, J.; Afarideh, H.; Ghergherehchi, M. (2016). *Estimation of photoneutron yield in linear accelerator with different collimation systems by Geant4 and MCNPX simulation codes*. Physics in Medicine and Biology. **61**: 2762-2779.
- Konefal, A.; Orlef, A.; Łaciaka, M.; Ciba, A.; Szewczuk, M. (2012). *Thermal and resonance neutrons generated by various electron and X-ray therapeutic beams from medical linacs installed in polish oncological centers*. Reports Of Practical Oncology And Radiotherapy. **17**: 339–346.
- Králík, M.; Solc, J.; Vondráck, V.; Smoldasová, J. and Farkasova, E. (2015). *Spectral fluence of neutrons generated by radiotherapeutic linacs*. Radiation Protection Dosimetry. **163**: 373–380.
- Mohammadi, A.; Afarideh, H.; Abbasi Davani, F.; Ghergherehchi, M. and Arbabi A. (2016). *Monte Carlo study of neutron-ambient dose equivalent to patient in treatment room*. Applied Radiation and Isotopes. **118**: 140-148.

- Mohammadi, N.; Hakimabad, H.M.; Motavalli, L.R. (2015). *Neural network unfolding of neutron spectrum measured by gold foil-based Bonner sphere*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **303**: 1687-1693.
- Polaczek-Grelik, K.; Karaczyn, B.; Konefal, A. (2012). *Nuclear reactions in linear medical accelerators and their exposure consequences*. Applied Radiation and Isotopes. **70**: 2332-2339.
- Romero-Exposito, M.; Sánchez-Nieto, B.; Terrón, J.A.; Lopes, M.C.; Ferreira, B.C.; Grishchuk, D.; Sandín, C.; Moral-Sánchez, S.; Melchor, M.; Domigo, C.; Gómez, F. and Sánchez-Doblado, F. (2015). *Commissioning the neutron production of a Linac: Development of a simple tool for second cancer risk estimation*. Medical Physics. **42**: 276-281.
- Rühm, W.; Mares, V.; Pioch, C.; Agosteo, S.; Endo, A.; Ferrarini, M.; Rakhno, I.; Rollet, S.; Satoh, D.; Vincke, H. (2014). *Comparison of Bonner sphere responses calculated by different Monte Carlo codes at energies between 1 MeV and 1 GeV potential impact on neutron dosimetry at energies higher than 20 MeV*. Radiation Measurements **67**:24-34.
- Soto-Bernal, T.G.; Baltazar-Raigosa, A.; Medina-Castro, D.; Vega-Carrillo, H.R. (2018). *Neutron production in the interaction of 12 and 18 MeV electrons with a scattering foil inside a simple LINAC head*. Applied Radiation and Isotopes. **139**: 46-52.
- Valero-Luna, C.; Guzmán-García, K.A.; Borja-Hernández, C.G.; Hernández-Dávila, V.M.; Vega-Carrillo, H.R. (2012). *Neutron área monitor with passive detector*. Revista Mexicana de Física. **58**: 262-264.
- Vaz, P. (2010). *Monte Carlo methods and techniques status and prospects for future evolution*. Applied Radiation and Isotopes. **68**: 536-541.
- Vega-Carrillo, H.R.; Baltazar-Raigosa, A. (2011). *Photoneutron spectra around an 18 MV LINAC*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. **287**: 323-327.